

Jukka Murtonen

# YHTEISTYÖROBOTTIEN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
12.2019

# TIIVISTELMÄ

**Jukka Murtonen:** Yhteistyörobottien käyttö teollisuudessa,

Applications of Collaborative Robots in Industrial Manufacturing

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Joulukuu 2019

---

Yhteistyörobotit yhdistävät ihmisen ja robotin kyvykkyudet luoden tehokkaan prosessin. Ne pystyvät useanlaisiin tehtäviin kuten siirtelemään kappaleita, työstämään niitä työkaluilla tai tarkistamaan niiden laatua yhteistyössä ihmisten kanssa. Yhteistyörobotit eivät aina tarvitse häkkeitä toimiakseen, sillä turvallisuus voidaan toteuttaa sensoreiden ja voiman rajoituksen avulla standardien asettamien vaatimusten täytyessä. Aina se ei kuitenkaan, onnistu vaan tarvitaan muitakin turvallisuusratkaisuja. Yhteistyöroboteja on helppo liikutella ympäri tehdasta niiden keveyden ja helpon ohjelmoinnin ansiosta. Kevyet rakenteet, turvallisuusratkaisut ja helppo ohjelmoitavuus tekevät yhteistyöroboteista edullisia automaatoratkaisuja. Joustavuutensa ansiosta yhteistyörobottien avulla kaiken kokoiset yritykset pystyvät automatisoimaan prosessejaan entistä pidemmälle.

Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä kandidaatintutkinnon osana. Työssä käsitellään yhteistyöroboteja teollisuuden näkökulmasta. Työssä on tutkittu yhteistyörobottien tarkoitusta, erilaisia yhteistyön muotoja, hyötyjä, yhteistyörobottien historiaa, ominaisuuksia yhteistyön, turvallisuuden, ohjelmoinnin ja taloudellisuuden näkökulmista, alantekijöitä ja yhteistyörobottien käyttösovelluksia. Työn lähteinä on käytetty tieteellisiä kirjoituksia, alan toimijoiden verkkosivuja ja artikkeleita.

Avainsanat: Yhteistyörobotit, cobotti, robotti, yhteistyö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	YHTEISTYÖROBOTIIKKA.....	3
2.1.	Standardit.....	4
3.	HISTORIA.....	7
4.	COBOTTIEN OMINAISUUKSIA.....	13
4.1.	Yhteistyö.....	13
4.2.	Turvallisuus .....	13
4.3.	Ohjelmointi ja yhdistettävyys.....	14
4.4.	Taloudellisuus .....	15
4.5.	Cobottien tulevaisuus .....	16
5.	ALAN PÄÄTEKIJÄT JA KÄYTTÖSOVELLUKSET .....	18
5.1.	Alan päätekijöitä .....	18
5.2.	Käyttösovellukset.....	20
5.2.1	Kappaleenkäsittely ja pakkaaminen .....	20
5.2.2	Koneen hoito.....	22
5.2.3	Prosessitehtävät ja viimeistely .....	22
5.2.4	Kokoonpano ja laaduntarkastus .....	24
5.2.5	Esimerkkijärjestelmä .....	25
6.	YHTEENVETO.....	29
	LÄHTEET .....	31

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

IFR	International Federation for Robotics
ISO	The International Organization for Standardization
GM	General Motors
UR	Universal Robots
ROI	Return on Investment
UC	University of California
IAD	Intelligent Assist Device

# 1. JOHDANTO

Vuonna 1995 Yhdysvalloissa Michael Peshkin, J. Edward Colgate ja General Motors kehittivät älykkään apulaitteen, jonka avulla ihminen ja robotti pystyivät tekemään yhteistyötä. Robotti oli kolmipyöräinen auton ovien nosteluun tarkoitettu apulaite, jonka avulla linjatyöntekijät saivat tehtyä työnsä paremmin ja rasittamatta itseään liikaa. [1, s. 335–341] Myöhemmin ideaa ihmisen ja robotin yhteistyöstä vietiin pidemmälle ja kehitettiin yhteistyöhön sopiva robottikäsi, joka oli kevyt, pienikokoinen, edullinen, helppokäyttöinen, joustava ja turvallinen [2].

Nykyään näitä yhteistyössä ihmisen kanssa toimivia robotteja kutsutaan yhteistyöroboteiksi. Yhteistyörobottien ansioista myös pienet yritykset ovat pystyneet hyödyntämään automatiikkaa prosesseissaan ja yritykset pystyvät kilpailemaan halvan työvoiman maiden kanssa sekä automatisoimaan prosessejaan pidemmälle. Yhteistyörobotit yhdistävät ihmisen ja robotin kyvykkyydet luoden tehokkaan prosessin. [3] Usein yhteistyörobotit eivät tarvitse häkkeitä toimiakseen, sillä turvallisuus toteutetaan sensoreiden ja voiman rajoituksen avulla. Jokaisessa prosessissa se ei kuitenkaan onnistu standardien määrittelemällä tavalla, vaan tarvitaan muitakin turvatoimenpiteitä. Yhteistyörobotteja on helppo liikutella ympäri tehdasta niiden keveyden ja helpon ohjelmoinnin ansiosta. Kevyet rakenteet, turvallisuusratkaisut ja helppo ohjelmoitavuus tekevät yhteistyöroboteista edullisia automaattioratkaisuja. [4]

Cobottien markkinoilla on jo useita tuottajia kilpailemassa ja tulevaisuudessa alan arvioidaan kasvavan huomattavasti teknologian kehittyessä [5]. Useilla teollisuudenaloilla pyritään automatisoimaan prosesseja entistä pidemmälle ja siten tuottamaan parempaa laatua ja valmistamaan tuotteita nopeammin. Yhteistyörobotit pystyvät useanlaisiin tehtäviin kuten siirtelemään kappaleita, työstämään niitä työkaluilla tai tarkistamaan niiden laatua. [6] Samalla ne vapauttavat ihmisen rasittavista tehtävistä siten säästäten työntekijöitä rasitusvammoilta samalla parantaen tarkkuutta ja laatua. [7]

Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä kandidaatintutkinnon osana. Työn tarkoituksena on tutustua teknologiaan, yhteistyöroboteihin, niiden tarkoitukseen, käyttöön, historiaan, hyötyihin, eri ominaisuuksiin sekä alan toimijoihin ja robottimalleihin. Työn lähteinä on käytetty tieteellisiä kirjoituksia, alan toimijoiden verkkosivuja ja artikkeleita.

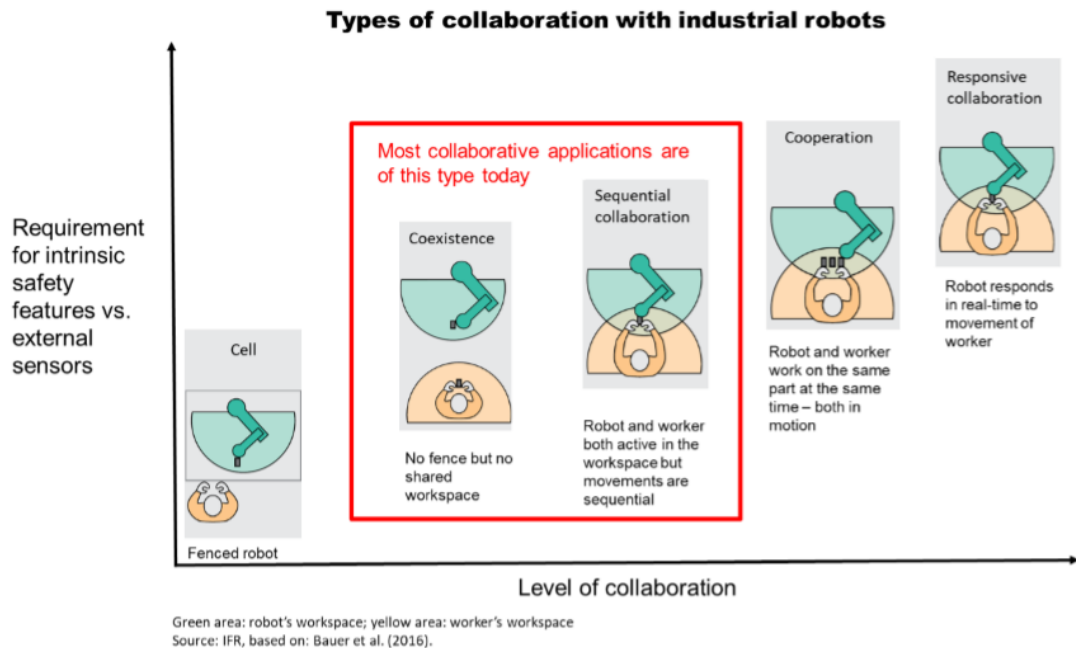
Työssä käsitellään yhteistyörobotteja teollisuuden näkökulmasta. Työn toisessa luvussa käsitellään yhteistyörobottien tarkoitusta, erilaisia yhteistyön muotoja, hyötyjä sekä yhteistyörobotteja koskevia standardeja. Kolmannessa luvussa on tarkasteltu yhteistyörobottien kehitystä ja historiaa. Neljännessä luvussa käsitellään yhteistyörobottien ominaisuuksia yhteistyön, turvallisuuden, ohjelmoinnin ja taloudellisuuden näkökulmista sekä tutkitaan tulevaisuuden näkymiä. Viidennessä luvussa käydään läpi alan päätekijöiden yhteistyörobottien ominaisuuksia ja niiden erilaisia käyttösovelluksia sekä tutustutaan tarkemmin esimerkkisovellukseen.

## 2. YHTEISTYÖROBOTIIKKA

Yhteistyörobotit ovat robotteja, jotka on suunniteltu työskentelemään ihmisten lähellä tai tekemään suoraa yhteistyötä ihmisten kanssa. Yhteistyörobotiikan tavoitteena on yhdistää ihmisten ja robottien kyvykkyudet. Robotit tuovat voimaa, kestävyyttä ja tarkkuutta, kun taas ihminen tuo ketteryyttä, joustavuutta ja ongelmanratkaisukykyä. Yhteistyön onnistuessa sen lopputuloksena on entistä tehokkaampi prosessi, joka on joustavampi, laadukkaampi, tarkempi ja tuottavampi ja säästää työntekijöitä epämukavilta työasenoilta ja rasitusvammoilta. [3,8]

Yhteistyö erottaa yhteistyörobotit perinteisistä teollisuusroboteista, jotka on suunniteltu toimimaan autonomisesti häkeissä toistaen samaa tehtävää nopeasti ja korkealla volyyymilla. Jotta yhteistyö ihmisen ja robotin välillä on mahdollista, yhteistyörobottijärjestelmät sisältävät erilaisia turvalaitteita ja -ominaisuuksia, kuten pyöreitä reunoja, kevyitä materiaaleja ja sensoreita. Myös perinteiset teollisuusrobotit voidaan muuntaa yhteistyöroboteiksi erilaisten sensoreiden avulla, jotta ihminen voi työskennellä turvallisesti niiden kanssa. [3]

Yhteistyörobotit ovat kokonaisinvestointeina perinteisiä teollisuusrobotteja edullisempia, minkä takia myös pienet ja keski suuret yritykset ovat pystyneet automatisoimaan prosessejaan. Yhteistyörobottien ansiosta on pystytty automatisoimaan tehtäviä, jotka olisivat muuten kalliita toteuttaa teollisuusroboteilla, ja osittain automatisoimaan tehtäviä, joissa vielä tarvitaan ihmisen aisteja. [3] Esimerkiksi sarjatuotannossa yhteistyörobotit vapauttavat ihmiset raskaasta ja itseään toistavasta rutiinista tekemään muuta, enemmän ajattelua ja ongelmanratkaisua vaativaa työtä. Parhaimmillaan yhteistyörobotti pysyy toistamaan samaa raskasta tehtävää tarkasti siten, että hävikki vähenee ja tuottavuus kasvaa. [8,9]



**Kuva 1.** Eri yhteistyötyyppejä [9].

IFR eli International Federation for Robotics määrittelee neljä yhteistyötyyppiä, jotka voi nähdä kuvassa 1. Yleisimmät tyypit ovat coexistence eli yhteiselo ja sequential collaboration eli peräkkäinen yhteistyö. Yhteiselossa ihminen ja robotti eivät jaa työtilaa ja peräkkäisessä yhteistyössä ihminen ja robotti jakavat työtilan, mutta eivät työstä yhtä aikaa samaa kappaletta. Cooperation tarkoittaa yhteistyötä, eli ihminen ja robotti työstävät samaa kappaletta yhtäaikaaisesti. Responsive collaboration eli reagoiva yhteistyö tarkoittaa yhteistyötä, jossa robotti reagoi ihmiseen reaaliajassa. [9]

## 2.1. Standardit

International Organization for Standardization eli ISO on suunnitellut robottijärjestelmiä koskevia standardeja. Standardien avulla tuotteet ovat tehdasjärjestelmiin yhteensopivia sekä turvallisia ihmisille ja ympäristölle. ISO 10218-01 ja 10218-02 säädettiin koskemaan robottijärjestelmiä, mutta niissä kuvaukset yhteistyöroboteista olivat kuitenkin yleisellä tasolla. ISO/TS 15066 julkaistiin vuonna 2016 käsittelemään tarkemmin yhteistyörobotteja. Standardeissa määritellään robotteja koskevat vaatimukset ja erilaisia yhteistyörobottien toimintatyppejä. Standardit määrittelevät riskiarvion toteutusta uutta yhteistyörobottijärjestelmää suunniteltaessa. Standardin mukainen riskien arviointi täytyy olla



tehty ja riskien täytyy olla riittävän pieniä, jotta suunniteltu järjestelmä voidaan toteuttaa. Riskiarviossa huomioon täytyy ottaa ympäristö ja robotin käyttötarkoitus, sillä yhteistyörobotti, joka on suunniteltu leikkaamaan asioita, on vaarallisempi kuin sama robotti lajittelemassa osia. [10]

Järjestelmän integroijan täytyy suorittaa riskin arviointi, jotta todettuja riskejä pystytään pienentämään erilaisilla toimenpiteillä. Riskin arvioinnin avulla riskejä voidaan tunnistaa ja arvioida koko robotin eliniält. Riskin arviointi sisältää robotti järjestelmän rajojen määrittämisen, vaarojen tunnistamisen, riskin suuruuden arvioinnin ja riskin merkityksen arvioinnin. [11]

Rajoja robottijärjestelmille määritellään standardeissa ISO 12100 ja ISO 11161 sekä muissa C-tyyppin standardeissa. Käytön rajat sisältävät esimerkiksi kuvauksia toiminnoista, käyttötarkoituksista ja -tavoista ja väärinkäytöistä. Tilarajoja ovat esimerkiksi koneen liikkeille tarvittava tila, asennuksen ja huollon vaatima tila sekä työntekijän tarvitsema tila. Aikarajoja ovat koneen osien kestävyysrajat, prosessin vaatimat aikarajat ja huoltovälit. Muita rajoja ovat esimerkiksi ympäristön rajat kuten kosteus, lika ja lämpö ja käsiteltävien materiaalien vaatimat rajat. [11]

Vaarojen tunnistamisen toteuttamiseksi järjestelmän integraattorin on tunnistettava järjestelmän käyttäjien suorittamat tehtävät. Näitä tehtäviä ovat esimerkiksi prosessin ohjaus, kappaleen lastaus, käsityövaiheet, vikojen etsiminen ja korjaaminen sekä laitteiden huolto ja puhdistus. Käyttäjää konsultoimalla varmistetaan riskien tunnistamisesta. Kun vaarat on tunnistettu, voidaan vaaroja poistaa tai riskejä pienentää suunnittelun, turvallisuusteknisten toimenpiteiden ja suojaustoimenpiteiden avulla. Kun riskit todetaan tarpeeksi pieniksi, voidaan yhteistyöjärjestelmä toteuttaa. Standardit määrittelevät neljä tapaa toteuttaa yhteistyö ihmisen ja robotin välillä: turvallisuuteen liittyvä valvottu pysäytys, käsiohjaus, nopeuden ja välietäisyyden valvonta sekä tehon ja voiman rajoitus suunnittelun tai valvonnan avulla. [11]

Turvallisuuteen liittyvän valvotun pysäytyksen mukainen robotti työskentelee itsenäisesti, mutta pysähtyy ISO 10218-1:n määrittelemällä tavalla ihmisen tullessa työtilaan ja jatkaa taas työtään ihmisen poistuttua. Melkein mikä vain teollisuusrobotti voidaan muuntaa tällaiseksi robotiksi erilaisten sensoreiden avulla. [10]

Käsiohjaus tarkoittaa operointitapaa, jossa robotille lähetetään käsikäyttöisellä ohjaimella liikkumiskäskyjä, joita sen tulee noudattaa, sekä missä kohdissa robotin pitää ottaa osasta kiinni ja missä päästää siitä irti. Standardi määrittelee, että robotin täytyy pystyä suorittamaan standardin ISO 10218-1 mukainen turvallisuuteen liittyvä valvottu pysähtyminen, jotta käsiohjaus voidaan suorittaa. Mikäli tehon ja voiman rajoittamisen vaatimukset täyttyvät järjestelmässä, käsiohjauksen vaatimuksien ei tarvitse täyttyä. [10]

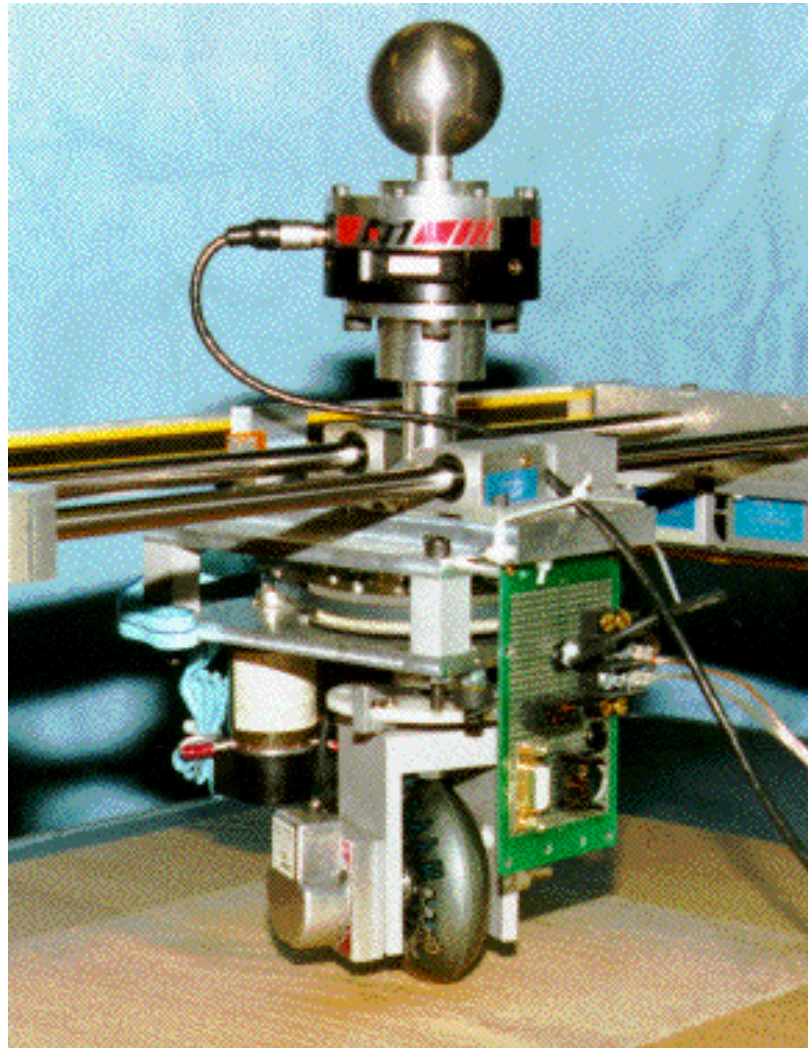
Nopeuden ja välietäisyyden valvonnan mukaisessa järjestelmässä robotti voi työskennellä ihmisen kanssa samassa työtilassa, mutta ihmisen lähestyessä robotti vähentää nopeuttaan etäisyyteen verrannollisesti. Mikäli ihminen tulee liian lähelle, robotti pysähtyy kokonaan ja jatkaa taas töitään ihmisen poistuttua turvaetäisyydeltä kasvattaen nopeuttaan ihmisen etäisyyteen verrannollisesti. [10]

Järjestelmä, joka on toteutettu tehon ja voiman rajoittamisella suunnittelun tai valvonnan avulla, tarkoittaa robottia, joka voi ottaa suoran kontaktin ihmiseen tai esteeseen. Robotti pysähtyy kokonaan tai liikkuu takaisinpäin huomattuaan esteen sisäänrakennettujen sensoreidensa avulla. ISO/TS 15066 määrittelee näille roboteille rajat voimien, paineen ja rasituksen suhteen. Tässä työssä käytetään sanaa cobotti eli collaborative robot viitattaessa tällä tavalla toteutettuihin yhteistyörobotteihin. [10]

### 3. HISTORIA

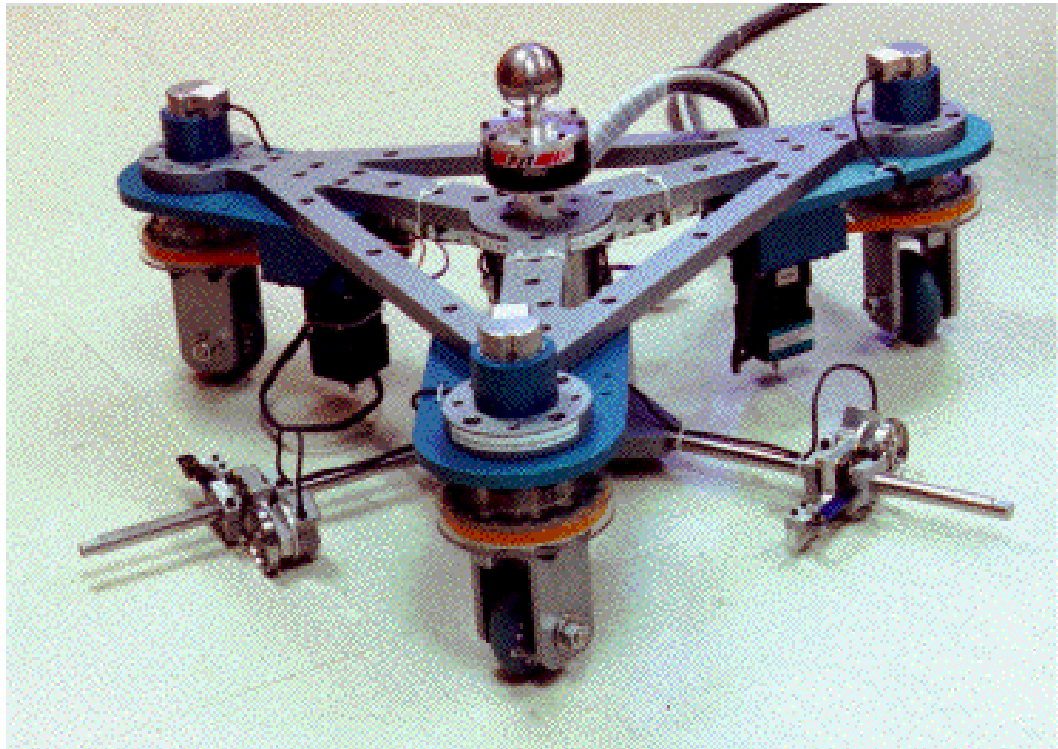
Vuonna 1995 Northwesternin yliopiston Michael Peshkin ja J. Edward Colgate sekä General Motorsin Prasad Akella aloittivat projektin älykkäiden apulaitteiden markkinoilla. Älykkäät apulaitteet eli IAD:t (Intelligent Assist Device) on tarkoitettu parantamaan työntekijöiden ergonomiaa, tuotteiden laatua ja prosessin tuottavuutta yhdistämällä robotiikkaa perinteisiin manuaalisiin apulaitteisiin. Projekti sai alkunsa General Motorsin halusta auttaa linjatyöntekijöitä tekemään työnsä paremmin. Tavoitteena oli kehittää robotti, joka olisi tarpeeksi turvallinen työskentelemään ihmisten kanssa, mutta ei kuitenkaan automatisoida kokonaan työtä, vaan hyödyntää ihmisen ja robotin vahvuuksia. Motivaationa oli myös päästä hyödyntämään robotiikkaa kaikissa tuotantoketjun osissa. Projektiryhmän lähestymissuuntana oli keksiä tapa implementoida virtuaalipintoja, jotka olisivat rajapintana ihmisen ja koneen välillä. Virtuaalipinnat voidaan käsittää näkymättömänä häkkinä, jonka ulkopuolella robotti ei voi liikkua. Virtuaalipinnat siis ohjaavat robotin pysymään määrättyjen rajojen sisällä. [1, s. 335–341][12]

Turvallisuuden takia ensimmäisissä yhteistyöroboteissa ei ollut omaa virtalähdettä, vaan työntekijä toi tarvittavan voiman lastin liikutteluun. Jos lasti meinasi karata ulos ohjatulta virtuaalipinnalta, robotti ohjasi sen takaisin. Työryhmä harkitsi voimakkaiden moottorien asentamista robotteihin, mutta päätyivät siihen, että ne ovat liian vaarallisia. [13] Perinteisiä servomoottorilla varustettuja robotteja harkittiin myös, mutta jotta moottorit pystyisivät vastustamaan ihmisen liikettä, lastin aiheuttamia voimia ja pysähtymään virtuaalipinnalla, olisivat ne olleet turvalliseen käyttöön liian voimakkaita. Jarruja harkittiin myös liikkeen rajoittamiseen, mutta sen toteuttaminen osoittautui turhan haastavaksi ja lisäksi jarrujen käyttö kuluttaa energiaa turhaan. Jotta robotti olisi turvallinen, päädyttiin ratkaisuun, jossa robotti voi tukea kuormaa, mutta liikuttamiseen tarvittavan voiman tuottaa ihminen. Tutkimusryhmä kuitenkin tajusi lopulta, että robotti voi myös itsenäisesti liikkua turvallisesti vaihteiston avulla ja näin keksittiin yhteistyörobotti, joka mahdollisti suurien virtuaalipintojen toteuttamisen ohjelmoimalla. [1, s. 335–341][14, s. 377–390]



**Kuva 2.** Yksipyöräinen yhteistyörobotti [14].

Ensimmäinen yhteistyörobotti oli yksipyöräinen ja se koostui operaattorin kahvasta, voima-anturista, raiteista, jotka pitivät robotin pystyssä, paikkamittareista, ohjausmoottorista ohjattavasta vaihteistosta ja yhdestä renkaasta (Kuva 2). Sillä oli kaksi tapaa toimia. Vapaassa tilassa robotti on poissa rajapinnoilta ja operaattorin työntäessä sitä tiettyyn suuntaan, voimamittari havaitsee voiman suunnan ja robotti kääntää pyöränsä voimaa vastaavaan suuntaan. Reittitilassa robotti kääntää pyörää moottorin avulla ja ohjaa lastia siten, ettei se poistu virtuaalipinnalta, vaan ohjautuu virtuaalipinnan rajoja pitkin. Koska robotin liikevoima tuli ihmiseltä, sillä ei ollut vaaraa vahingoittaa operaattoria. [1, s. 335–341][ 14, s. 379][15]



**Kuva 3.** Kolmipyöräinen yhteistyörobotti [15].

Yksipyöräisen yhteistyörobotin kaksiulotteisesta työympäristöstä päästiin kolmiulotteiseen rakentamalla kolmipyöräinen yhteistyörobotti (Kuva 3). Kolme pyörää mahdollistivat robotin pystyssä pysymisen ilman raiteita sekä virtuaalipintojen ohjelmoinnin asennon ja paikan perusteella. Robotin jokaista rengasta ohjattiin itsenäisesti omilla servomootoreilla ja se pystyi jarruttamaan kääntämällä pyöriä eriäviin asentoihin siten, että pyöriminen estyi. Kolmipyöräisen yhteistyörobotin perusteella General Motors suunnitteli teollisuuteen sopivan version. [1, s. 335–341][ 14, s. 382][15]



**Kuva 4.** General Motorsin yhteistyörobotti [15].

Kolmipyöräiseen pohjautuva General Motorsin yhteistyörobotti oli pelkistetty, mutta helposti ohjailtava laite (Kuva 4). Se suunniteltiin avustamaan työntekijöitä ovien poistossa juuri maalatuista autoista. Tehtävä valittiin sillä perusteella, että työntekijöiden oli vaikeaa poistaa ovia vahingoittamatta maalattua pintaa. Työntekijää tarvitaan kuitenkin muissa tehtävän vaiheissa. Robotti liikkuu sujuvasti servo-ohjattujen renkaiden päällä vaatien ihmiseltä vain vähän työntövoimaa. Lähestyttäessä auton ovea robotin virtuaalipinnat ohjaavat sen oikeaan asentoon poistoa varten, siten ettei robotti törmää autoon tai väärällä asennolla vahingoita sitä. Oven irrottua robotti kannattelee sen painoa, jotta työntekijän on helpompi liikutella sitä. [1, s. 335–341][15]





**Kuva 5.** UC Berkeleyn Z-nostin [16].

Toisen älykkään nostolaitteen General Motorsille kehitti University of California Berkeleyn tutkijaryhmä. Laite oli katosta roikkuva kaapelinostin ja sitä kutsuttiin Z-nostimeksi (Kuva 5). Nostimen kahvassa oli sensoreita, jotka mittasivat mihin suuntaan operaattori halusi kuormaa liikuttaa. Kun kahva havaitsi mihin suuntaan operaattori sitä halusi liikuttaa, moottorit liikuttivat lastia haluttuun suuntaan välittömästi. Käytännössä ihmisen täytyi siis vain ohjata lastin suuntaa ja laite hoiti nostamisen ja liikuttelun, ikään kuin lasti vain leijuisi ilmassa. [16]

General Motorsin linjatyöntekijät pitivät sekä ovenpoistoon tarkoitetusta yhteistyörobotista, että Z-nostinta hyvin hyödyllisinä laitteina. Työntekijät arvostivat sitä, että laitteet eivät pyrkineet korvaamaan heitä vaan tekivät työstä helpompaa. [16]

Yhteistyörobotit alkoivat muovaantua robottikäsien muotoon Tanskassa vuosina 2001-2005, kun Etelä-Tanskan yliopistossa Esben Østergaard tutkimusryhmineen kehittivät ruokateollisuuteen robottijärjestelmää. Projektissa kehitettiin robotti pienelle leipomotuotteiden tuottajalle, mutta lopputulos oli liian suuri ja monimutkainen kirsikoiden laittamiseen kakun päälle. Robotti ei myöskään ollut tarpeeksi joustava vaihtelevaan tuotantoon. Tästä tutkimusryhmä huomasi tarpeen sen aikaisia robotteja joustavammalle ratkaisulle teollisuudessa. Ryhmä havaitsi myös markkinaraon uudentyläiselle robotille, joka

olisi ennemmin kevyt ja helposti ohjelmoitava työkalu kuin suuri häkissä oleva robotti, joka eliminoi työpaikkoja. [17]

Työryhmä perusti Universal Robots -yrityksen vuonna 2005 tarkoituksenaan tehdä roboteista hyviä ratkaisuja myös pienille yrityksille. Yritys kehitteli UR5-cobotin, joka oli ensimmäinen kaupallinen cobotti, joka pystyi operoimaan turvallisesti ilman häkkiä. Tämän lisäksi UR5 oli myös kevyt, helppokäyttöinen ja joustava. Ensimmäisen UR5:den osti tanskalainen teknisen muovin ja kumin valmistaja Linatex vuonna 2008. Linatex pystyi ohjelmoimaan cobotin itsenäisesti ilman kalliita ohjelmoijia helpon kosketusnäyttökäyttöliittymän kautta. [2, 18]

UR-cobotteja kohtaan oltiin aluksi hyvin epäluuloisia. Robottien toimiminen ilman häkkejä ja niiden turvallinen törmäminen työntekijöihin esityksissä veti paljon yleisöä puoleensa. Mitään sen kaltaista ei ollut ennen nähty ja kaikki uskoivat, että ne katoaisivat nopeasti. Mutta näin ei kuitenkaan käynyt, vaan markkinoille tuli uusia cobottivalmistajia. [2] Suuret robottivalmistajat, kuten ABB, KUKA ja FANUC toivat markkinoille omat cobottinsa. KUKA toi markkinoille oman LBR iiwa cobottinsa ja ABB ensimmäisen kaksikäätisen cobotin, YuMi:n [19, 20]. Ensimmäinen FANUC:in markkinoille tuoma cobotti oli CR-35iA, joka pystyi kantamaan 35 kilon hyötykuormaa [21].



## 4. COBOTTIEN OMINAISUUKSIA

Coboteilla on useita ominaisuuksia, jotka erottavat ne perinteisistä teollisuusroboteista. Ominaisuuksillaan cobotit vastaavat markkinoiden kasvavaan tarpeeseen automatisoida tehtäviä pidemmälle ja tekevät roboteista edullisia ja helppokäyttöisiä automaattioratkaisuja kaiken kokoisille yrityksille.

### 4.1. Yhteistyö

Cobottien päätarkoitus on yhteistyö. Yhteistyörobotit suunnitellaan toimimaan suorassa yhteistyössä ihmisen kanssa häkissä toimivan raskaan teollisuusrobotin sijaan. Perinteisten teollisuusrobottien ympärillä on usein aita estämässä ihmisiä menemästä robotin työtilaan. Yhteistyörobottien avulla ihmisen ei tarvitse poistua robotin työtilasta, vaan työntekijä voi jäädä tilaan tekemään omaa tehtäväänsä. Näin yritys säästää tilaa ja aikaa, sillä häkkiä ei tarvita ja työntekijän ei tarvitse kulkea tilasta toiseen. [4]

Yhteistyö voi vaihdella robotin ja ihmisen yhteisestä työtilasta, jossa osapuolet eivät suorita suoraa yhteistyötä, robottiin, joka mukauttaa asentoaan ihmisen mukaan. Yleisin yhteistyön muoto on jaettu työtila, jossa ihminen ja robotti tekevät omia tehtäviään vuorotellen. Usein robotin tehtävä on itseään toistava tai epäergonominen. Tehtävät voivat olla raskaiden osien nostelua, ruuvien ruuvausta tai rasittavien koneiden käyttöä. Robotti, joka reagoi ihmiseen reaaliajassa on kaikista vaikein toteuttaa teknisesti ja turvallisesti ja siksi ne ovat teollisuudessa harvinaisia. Tällaisissa toteutuksissa cobotti voi esimerkiksi pitää osaa tietyssä asennossa, jotta ihmisen on mukavampi ja ergonomisempi työkennellä osan kanssa. [3,9]

### 4.2. Turvallisuus

Perinteinen teollisuusrobotti ei ole suunniteltu turvalliseen yhteistyöhön ihmisen kanssa, vaan suorittamaan tiettyä sille määrättyä tehtävää nopealla tahdilla ja korkealla volyymilla. Turvallisen yhteistyön ihmisen ja robotin välillä mahdollistavat robottien voiman rajoittaminen sekä erilaiset anturit ja sensorit, jotka varmistavat, että robotit eivät aiheuta

ihmiselle vaaraa tai vahinkoa. Sensorit voivat aistia vääntöä, voimaa tai erikoisemmin valoa, ääntä tai kosketusta [3]. Sensori voi olla integroitu robottiin siten, että sensorin havaitessa liian suuren voiman robotti lopettaa liikkeensä. Näiden sensoreiden avulla voidaan perinteisestä teollisuusrobotista muokata yhteistyörobotti. Turvallisuutta varmistamassa voivat olla myös nivelet, jotka huomatessaan ulkoisen voiman antavat sille periksi, jottei vahinkoja synny vastavoiman aiheuttavalle ihmiselle tai asialle. Työtahtia hidastaa kuitenkin cobottien turvavaatimukset, sillä ne eivät voi liikkua liian nopeasti työtiloissaan ihmisen kanssa, vaan joutuvat hidastamaan ja väistämään ihmisen liikkeessä. Turvallisuuden takia cobotit eivät myöskään pysty liikuttelemaan suuria kuormia. [22,4]

Yhteistyörobotit ovat huomattavasti kevyempiä kuin perinteiset teollisuusrobotit. Kevyempi rakenne edistää robottien nopeaa liikuttelua uusiin tehtäviin ja tekee roboteista turvallisempia. [4] Yhteistyörobotit eroavat perinteisistä roboteista myös muodoillaan. Cobottien muodot ovat usein pyöreämpiä kuin perinteisten robottien. Pyöreä muoto jakaa osumatilanteessa iskun suuremmalle alueelle kuin perinteisen robotin kulmikkaat muodot ja siten aiheuttaa vähemmän vahinkoa. Joissain coboteissa on pehmustettuja kuoria iskun voimaa vähentämässä. [22] Turvallisuutta kuitenkin vähentää robotin työkalu. Robotin tarttuja tai työkalu voi olla terävä tai muuten vaarallinen ihmiselle. Aina yhteistyörobottijärjestelmää ei pystytä suunnittelemaan tarpeeksi turvalliseksi ja turvaamaan tarvitaan muita toimenpiteitä tai esimerkiksi häkkeitä. [10]

### **4.3. Ohjelmointi ja yhdistettävyyys**

Coboteissa on sensortechniikan lisäksi myös systeemejä, jotka ovat yhteydessä Internet-of-Things:iin eli IoT:hen tai muihin järjestelmiin, kuten varastohallintajärjestelmään tai huolto- ja ylläpitojärjestelmään. Cobotit sisältävät tehokkaita tietokoneita ja siten ne on helppo liittää IoT:hen datan keruuta ja analysointia varten. IoT:n avulla cobotit voivat tietynlaisissa sovelluksissa joustavasti vaihtaa tuottamaansa tuotetta tarpeen mukaan saadessaan tiedon vaihdosta. Cobotit kehittyvät jatkuvasti myös tehdasympäristöissä uusien ohjelmistojen päivittyessä niihin. Yhdistettävyytensä ansiosta cobotit mahdollistavat myös uusia palveluja, kuten Hireroboticsin robotin vuokrauspalvelun, joka vuokraa

robotteja tuntihintaan. Yhteistyörobottien yhteys IoT:hen herättää myös kyberturvallisuushuolia. IoT:n avulla hakkerit voivat päästä käsiksi yhteistyörobottien dataan ja siten suorittaa teollisuusvakoilua tai pahimmassa tapauksessa ohjailla robotteja ja siten vahingoittaa henkilöstöä tai laitteistoja. [23]

Cobotteja on myös helppo ohjata yksinkertaisten käyttöliittymien kautta, jotka ovat usein cobotteihin liitetyissä tableteissa tai muissa samankaltaisissa järjestelmissä. [4] Helppo-käyttöisyys ilmenee myös ohjelmoinnin helppoudessa, sillä esimerkiksi Rethink Robotics'in Baxter voidaan ohjelmoida esimerkin avulla, eli liikuttamalla sen kättä haluttua reittiä. Ohjelmoinnin jälkeen Baxter seuraa itsenäisesti näytettyä reittiä. Helposti esimerkiksi ohjelmoitavan robotin voi antaa kelle tahansa työntekijälle työkaluksi helpottamaan ja nopeuttamaan tämän työtä. [3]

#### **4.4. Taloudellisuus**

Yhteistyörobotit ovat hyvin taloudellisia, sillä ne säästävät yritykset arvokkailta investoinneilta. Koska cobotit ovat pienempiä, vievät ne vähemmän tilaa ja resursseja yritykseltä. Turvallisuusominaisuudet, kevyt rakenne ja ohjelmoinnin helppous mahdollistavat cobottien helpon asennuksen laitoksiin sekä siirtelyn tehtaan sisällä uusiin tehtäviin. Cobottien ansiosta yritykset siis säästävät rahaa siten, että niiden ei tarvitse hankkia suuria ja kalliita teollisuusrobotteja ja turvallisuusratkaisuja joka tehtävälle erikseen. Ohjelmoinnin helppouden takia säästyy yrityksiltä myös rahaa, sillä niiden ei tarvitse palkata kalliita ohjelmoijia pitkiksi ajoiksi kuten perinteisten raskaiden teollisuusrobottien tapauksessa. [24, s. 18]

Coboteilla on myös hyvä sijoitetun pääoman tuottoaste eli ROI. ROI on korkea, sillä ihmisten tuottavuus paranee rasittavien tehtävien vähentyessä ja yrityksellä on mahdollisuus automatisoida useita tehtäviä, joita ei ole ennen voitu automatisoida. ROI on myös korkea, koska yhteistyörobotit ovat edullisia kokonaisinvestointeja, helppoja asentaa ja työntekijät eivät vaadi laajaa koulutusta niiden käyttöön. Edullisuutensa ja joustavuutensa takia Cobotit sopivat hyvin pienten ja keskisuurten yritysten käyttöön, joilla ei ennen yhteistyörobotteja ollut varaa automatisoida prosessejaan. [3, 23]

Coboteilla on kuitenkin myös piilokuluja, joita niiden integroimisesta tehtaaseen aiheutuu. Cobotti voi esimerkiksi vaatia uusien kommunikointiväylien asentamista tehtaalle tai ohjelmointia, jotta se voi kommunikoida tehtaan muiden järjestelmien kanssa. Cobotti voi myös muuttaa prosessia tavalla, johon täytyy reagoida. Tiedetyt prosessit tai tuotteet voivat vaatia myös tiettyjä vaarallisempia työkaluja coboteille, minkä takia cobotin hyödyntäminen saattaa vaatia häkkiä tai muita turvatoimenpiteitä. Joustavuuden ansiosta cobotteja on mahdollista liikutella tehtaan sisällä toisiin tehtäviin, mutta siirtelystä aiheutuva käytökatko ja tarvittava työ sen uudelleen käyttöönottoon voi olla yritykselle kallista. Turvallisuus ominaisuuksien takia cobotit ovat myös hitaampia kuin perinteiset teollisuusrobotit, minkä takia tehtaan kiertoaajat ja tuotanto voivat kärsiä. Cobottien turvalliset ja kevyet materiaalit voivat tarkoittaa myös sitä, että cobotit eivät ole yhtä kestäviä kuin raskaat teollisuusrobotit. Kevyet materiaalit kuluvat nopeammin ja vaativat huoltoa useammin tai jopa uuden cobotin hankkimista. Myös ohjelmoinnin helppoudella on kääntöpuoli, sillä jos cobotin haluaa suorittavan monimutkaisia tehtäviä, tarvitaan kokeneempaa ohjelmointia toteuttamaan tehtävän ohjelmointia. Riskien arviointi auttaa näiden tarpeiden ja kulojen arvioinnissa ja sen avulla voi päätellä, onko kannattavaa hankkia cobotti prosessiin. [24, s. 18, 20–21]

## 4.5. Cobottien tulevaisuus

Yhteistyörobotiikan kehittyessä tulevaisuuden tehtaista tulee entistä data- ja ohjelmistolähtöisempiä. Teollisuuden tekijät haluavat hyödyntää big dataa ja Industrial Internet of Things:iä yhdistääkseen koneistoa, jotta prosessista saataisiin entistä tehokkaampi ja tuottavampi. Boston Consulting Group ennustaa, että automaation määrä kasvaa 150 prosenttia seuraavan kymmenen vuoden aikana ja BIS Research arvioi, että yhteistyörobottien markkinat kasvavat noin kahteen miljardiin Yhdysvaltain dollariin ja 150000 myytyyn yksikköön. [7][25, s. 12] Lisäksi markkinatutkimuksia tekevä Interact Analysis arvioi, että vuonna 2027 30 prosenttia myydyistä roboteista on cobotteja [5].

Yhteistyörobottien kehittyessä ne tulevat hyödyntämään entistä monimutkaisempia tekoäly- ja koneoppimisjärjestelmiä. Kun cobotit saavat hyödynnettyä tekoälyä ja koneäköä, pystyvät ne ratkaisemaan entistä monimutkaisempia ongelmia. Esimerkiksi osiin tarttuminen helpottuu, kun cobotti voi nähdä minkälaiseen osaan se tarttuu. Osalle suunnitellun tarttujan sijasta cobotti voi tarttua osaan yleistarttujan avulla, kuten ihminen

kädellään. Tekoälyn ja konenäön avulla voidaan myös kehittää entistä voimakkaampia ja nopeampia cobotteja, jotka ovat silti turvallisia ihmisille. Konenäön avulla cobotti voi tunnistaa lähestyvän ihmisen ja tekoälyn avulla laskelmoida tarvitseeko havaintoon reagoida ja tarvittaessa hidastaa tai pysäyttää liikkeensä. [26, s. 62, 64, 66]

Cobottien ROI kasvaa vielä entisestään niiden hintojen pienentyessä ja työntekijöiden kallistuessa. Korkea ROI houkuttelee yrityksiä automatisoimaan tehtaitaan pidemmälle. Tuotteiden nopeat muutokset ja kiertoajat ovat myös yleistymässä, minkä takia yhteistyörobotit ovat myös houkutteleva ratkaisu automatisointiin joustavuutensa ansiosta. Cobottien yleistymistä kuitenkin jarruttaa työvoiman väheneminen, sillä kun ei ole työntekijöitä, ei coboteille ole työpareja. Vähäinen työvoima myös vähentää yritysten halua investoida uuteen teknologiaan. [26, s. 64, 66]

## 5. ALAN PÄÄTEKIJÄT JA KÄYTTÖSOVELLUKSET

Tänä päivänä yhteistyörobotteja käytetään suurimmaksi osaksi tuotannotehtävissä ihmisten lähellä työskentelyyn. Yhteistyörobotteja käytetään prosessien automatisointiin ja joustavuutensa ansiosta ne auttavat yrityksiä vastaamaan nopeasti muuttuviin markkinoihin ja vaihtuviin tuotteisiin. Cobottien joustavuus ja helppo ohjelmointi mahdollistavat yrityksille niiden siirtelyn linjalta toiselle kysynnän muuttuessa. Joustavuutensa ansiosta cobotit toimivat hyvin esimerkiksi pakkaus- ja huoltotehtävissä. Erityisen hyödyllisiä cobotit ovat jatkuvasti yleistyvissä työympäristöissä, joissa on paljon muuttuvia tekijöitä, jotka mahdollistavat eri tuotteiden valmistamisen asiakkaiden haluamiksi. [25, s. 13–14]

Yhteistyörobotit ovat houkutteleva ratkaisu kaiken kokoisille yrityksille edullisuutensa, turvallisuutensa ja helppokäyttöisyytensä vuoksi. Cobotit hyödyttävät erityisesti pieniä ja keskisuuria yrityksiä, joiden on vaikea automatisoida prosessejaan käyttäen perinteisiä teollisuusrobotteja. Myös suuret massatuotantoyritykset hyötyvät coboteista, sillä niiden avulla yritykset saavat prosessejaan automatisoitua vielä pidemmälle. [27, s. 163] Houkuttelevuutensa ja hyödyllisyytensä takia yhteistyörobottien jatkuvasti kasvavilla markkinoilla on paljon kilpailua. Yrityksiä on perustettu tuottamaan yhteistyörobotteja ja myös vanhemmat robottivalmistajat ovat laatineet omia versioitaan.

### 5.1. Alan päätekijöitä

Teollisuudessa yhteistyöroboteille on paljon käyttöä ja siten alalla onkin paljon kilpailua. Nykypäivänä suuri osa robottivalmistajista kilpailee yhteistyörobottien markkinoilla ja niitä valmistetaan ympäri maailmaa. Suurin markkinaosuus eli melkein 50 prosenttia oli vuonna 2017 alan pioneerilla, Universal Robotsilla [5]. Muita tärkeitä cobotti valmistajia ovat FANUC, TechMan Robot, ABB ja KUKA.

Universal Robots valmistaa neljää kuusiakselista cobottia, jotka ovat UR3, UR5, UR10 ja UR16. UR:n tarjooman avulla voidaan toteuttaa useita tehtäviä ruuvaamisesta raskaiden työkalujen käyttöön. Pienin cobotti eli UR3 pystyy kantamaan kolmen kilon hyötykuormaa ja ylettyä 500 millimetrin päähän. Se sopii asennettavaksi pöydälle tai ahtaan tilaan, sillä se painaa vain 11 kiloa ja sen halkaisija on 128 millimetriä. UR3 sopii

hyvin pienien osien kokoonpanotehtäviin tai ruuvaamaan ruuveja. UR5 pystyy kantamaan viiden kilon hyötykuormaa ja ylettyy 850 mm. Se on suunniteltu yleisrobotiksi ja oli Universal Robotsin ensimmäinen cobotti ja siten se suunniteltiin joustavaksi ja helpoksi integroida erilaisiin järjestelmiin. UR10 pystyy kantamaan kymmenen kilon kuormia ja ylettyy 1300 millimetrin päähän. Pitkän ylettävyytensä ansiosta se sopii hyvin esimerkiksi pakkaustehtäviin. UR16 on yrityksen uusi cobotti. Se pystyy kantamaan 16 kilon kuormia ja siten sopii hyvin raskaampien työkalujen käyttöön tai raskaiden osien paketointiin. [28]

FANUC tuottaa kuutta cobottia joissa jokaisessa on kuusi akselia. Mallit ovat CR-4iA, CR-7iA, CR-7iA/L, CR-14iA/L, CR-15iA ja CR-35iA. Niiden hyötykuormat vaihtelevat neljästä kilosta 35:een kiloon ja 550 millimetrin ylettyvyydestä 1813 millimetriin. CR-4iA, CR-7iA, CR-7iA/L, CR-14iA/L ovat samantapaisia keskenään ja sopivat hyvin esimerkiksi pieniin kokoonpanotehtäviin tai prosessitehtäviin, kuten liiman levittämiseen. CR-15iA on ohuempi kuin muut mallit ja pitkän 1441 millimetrin ylettyvyytensä ansiosta sopii hyvin esimerkiksi lajittelemaan tai keräämään erilaisia osia paketteihin. CR-35iA omaa alan suurimman hyötykuorman. 35 kilon hyötykuormansa ja pitkän 1813 millimetrin ylettyvyytensä ansiosta se sopii suurien ja painavien osien käsittelyyn, kuten siirtelyyn, lajitteluun tai pitelemään osia paikallaan ihmisen niitä työstäessä. [20]

TechMan Robot valmistaa neljää cobottia ja niistä liikkuvia versioita. Mallit ovat TM5-700 ja 900, TM12, TM14 ja niistä liikkuvat M- eli mobiilisarjan mallit. Cobottien hyötykuormat ovat neljästä 14:sta kiloa ja niiden ylettyvyudet 700-1300 millimetriä. TM5 sopii hyvin esimerkiksi elektroniikka teollisuuteen pienien osien käsittelyyn. TM12 ja 14 sopivat isompien tuotteiden käsittelyyn kuten vaikka koneiden käyttöön tai isojen pakettien siirtelyyn. Mobiilisarjassa cobottien mukana tulee sisäänrakennettu virtalähde, jonka ansiosta ne sopivat yhteen useiden markkinoilla olevien vihivaunujen (AGV eli Automated Guided Vehicle) kanssa. Kilpailijoistaan TM-cobotit erottuvat sisäänrakennetulla näköjärjestelmällä. Näköjärjestelmä auttaa cobotteja tunnistamaan osia muodon ja kuvien perusteella, mahdollistaa viivakoodien skannauksen sekä auttaa mobiilisarjan cobotteja liikkumaan. [29]

ABB tuottaa kahta YuMi-cobotia, IRB 14000 YuMi ja IRB 14050 YuMi. Molemmat cobotit ovat seitsemänakselisia. Toinen cobotti on kaksikäsinen ja toinen yksikäsinen. Molemmat

cobotit voivat kantaa 0.5 kilon hyötykuormia ja yltävät 559 millimetrin päähän. Kaksikälinen YuMi sopii hyvin pienten osien kokoonpanoon kahden käden tuoman joustavuuden, osien syöttöjärjestelmän ja kameralla toimivan osien paikannuksen ansiosta. Keveys, pehmusteiden ja rajallisen voiman ansiosta se on hyvin turvallinen ihmisille. YuMi:t ovat hyvin tarkkoja ja pystyvät esimerkiksi pujottamaan langan neulansilmästä läpi. [20]

KUKA valmistaa kahta cobottimallia, LBR iiwa ja LBR iisy. LBR iiwa on seitsemänakselinen, mikä erottaa sen kilpailijoistaan. LBR iiwa:sta on kahta versiota, jotka voivat kantaa seitsemän tai 14:sta kilon hyötykuormaa ja ylettyvät 800 millimetrin päähän. Seitsemän akselinsa ansiosta LBR iiwa pystyy toimimaan ihmiskäden tavoin ja on hyvin joustava. Käden päähän asennettavan toimilaitteen tehrolähteet ovat kuoren sisällä suojassa. LBR iiwa tarjoaa pneumaattisen ja sähköisen tehrolähteen käsiin asennettaville toimilaitteille. [19] LBR iisy on kuusiakselinen, voi kantaa kolmen kilon hyötykuormaa ja yltää 600 millimetrin päähän ja siten sopii hyvin ahtaisiin tiloihin. Se on tarkoitettu hyvin joustavaksi ja toimiikin hyvin nopeasti muuttuvissa tehtävissä joustavuutensa ansiosta. LBR iisy tukee teollisuuden toimintoja kuten OPC UA, kenttäväyliä ja digitaalisia ja analogisia I/O:ita ja on siten helppo integroida mihin tahansa teollisuuden ympäristöön. [30]

## **5.2. Käyttösovellukset**

Teollisuudessa on paljon tehtäviä, joissa yhteistyörobotteja voidaan hyödyntää. Joustavuutensa ansiosta edellä esiteltyjen ja monien muiden valmistajien cobotit sopivat useanlaisiin tehtäviin kaikilla teollisuuden alueilla. Yleisimpiä käyttösovelluksia ovat kappaleenkäsittely, pakkaaminen, koneen hoitaminen, prosessitehtävät, kokoonpano, viimeistely ja laaduntarkastus. [6,7]

### **5.2.1 Kappaleenkäsittely ja pakkaaminen**

Kappaleenkäsittely on teollisuudessa hyvin yleinen tehtävä esimerkiksi pakkauksessa tai lajittelussa. Manuaalisesti tehtynä nämä tehtävät voivat olla turruttavia, työläitä ja aika vieviä. Ihmiseltä ei voi olettaa loputonta energiaa ja keskittymistä näissä tehtävissä. Tehtävien itseään toistavan luonteen takia ihminen saattaa niissä tehdä virheitä, jos osia pitää esimerkiksi lajitella. Saman liikkeen tekeminen toistuvasti voi aiheuttaa ihmiselle



myös rasitusvammoja. Cobotin avulla saadaan ihminen vapautettua tästä tehtävästä ja laatua parannettua. [6, 7, 31]



**Kuva 6.** UR5-cobotti poimimassa lasiputkia [31].

Poimimiseen ja asettamiseen tarkoitettu cobotti poimii kohteen yleensä siihen erikoistuneella tarttujalla ja laskee sen määrättyyn paikkaan. Poimimisen ja asettamisen alalaji on pakkaaminen ja lavalle asettelu. Ennen tehtaalta lähtöä tuotteet täytyy pakata kuljetusta varten. Tuotteita voidaan esimerkiksi kääriä pakkausmuoviin ja lastata laatikkoon tai lavalle. Tehtävä sopii hyvin coboteille, sillä lastit ovat kevyitä, tehtävä itseään toistava ja cobottien joustavuuden ansiosta vaihtuvat tuotteet eivät estä niiden käyttöä. [7] Haasteena tässä tehtävässä on tarttujien monimutkaisuus. Robotti ei pysty tarttumaan kapaleisiin samalla tavalla, kuin ihminen kädellään, vaan tarvitsee usein tehtävään suunnitellun tarttujan. [26]

Esimerkiksi Universal Robotsin UR5- ja UR10-cobotit sopivat tähän tehtävään. Hofmann Glastechnik GmbH tuottaa herkkiä lasisia putkia kahden cobotin, UR5:den ja UR10:n avulla, joista UR5 on kuvassa 6. Cobotit asettavat sulia lasiputkia muovauskoneeseen. Cobottien avulla Hoffmannilla on pystytty vapauttamaan työntekijät tehtävästä, jossa heillä oli vaikeuksia pysyä mukana tuotannon tahdissa. Cobotit pystyvät työhön tarkasti ja ovat parantaneet tuotteiden laatua ja tuotannon tehokkuutta tehtaalla. [31]

### 5.2.2 Koneen hoito

Koneen hoidossa ihmisen täytyy vaihtaa laitteeseen työkaluja, lisätä koneelle materiaalia tai poistaa valmis tuote laitteesta. Työ on itseään toistavaa rutiinia, mutta vaatii tarkkuutta ja siksi on ihmiselle haastavaa vireyden laskiessa työpäivän aikana. Tarkkaavaisuuden laskiessa tylsässä tehtävässä ihminen ei välttämättä enää tuota laadukasta lopputulosta ja kone voi aiheuttaa jopa tapaturmia. Koneen hoidossa cobotti pystyy toistamaan tarkasti ja nopeasti saman tehtävän väsymättä siihen ja voi hoitaa samalla useita koneita. Cobotti ei myöskään tarvitse taukoja ja voi toistaa työtä niin kauan kuin vaaditaan. [7,32]



**Kuva 7.** TM Cobotti koneenhoidossa [33].

TM Robotin toteutuksessa heidän cobottinsa on liitetty PMC AGV:hen eli automaattisesti liikkuvaan kääryyn (Kuva 7). Cobotti ottaa käärystä kappaleen ja asettaa sen sorviin. Osan valmistuessa cobotti ottaa sen pois ja tarvittaessa laittaa uuden osan tilalle työstettäväksi. Liikkuvuutensa ansioista cobotti voi hoitaa useaa sorvia samaan aikaan ja siten parantaa usean laitteen tuottavuutta ja laatua tarkkuudellaan. TM robotteihin integroidun kameran avulla cobotti voi samalla tarkistaa laatua osan valmistuttua. [33]

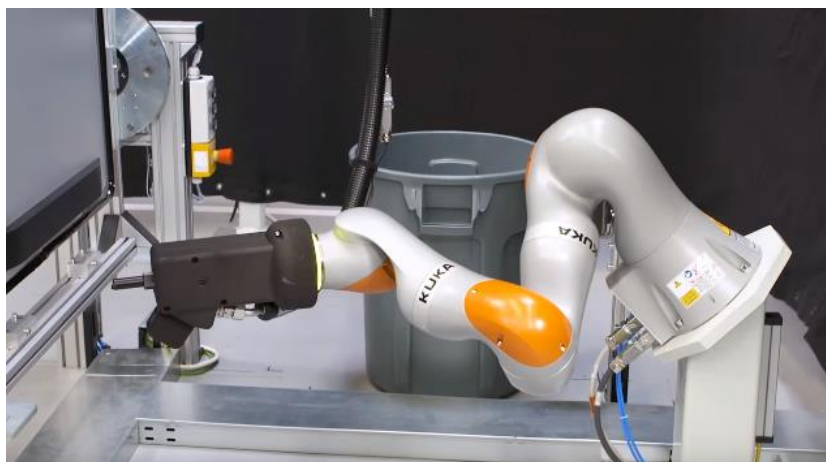
### 5.2.3 Prosessitehtävät ja viimeistely

Prosessitehtävissä jokin työkalu työstää kappaletta. Tehtävä voi olla esimerkiksi hitsausta tai liimausta. Tehtävä vaatii saman asian tekemistä toistuvasti määrättyä reittiä pitkin. Ihmiselle tämä tehtävä on haastava hoitaa joka kerta tarkasti ja laadukkaasti,

mutta cobotti tuottaa tarkkaa ja laadukasta tulosta väsymättä tehtävään. Lisäksi tulevaisuudessa odotetaan olevan pulaa ammattihitsaajista, joten hitsaukseen varustellut cobotit ovat yrityksille hyvä ratkaisu. [7,6]

Esimerkillä ohjelmitava cobotti voidaan ohjelmoida suorittamalla tehtävä kerran laadukkaasti, jonka jälkeen cobotti seuraa esimerkillä ohjelmoitua rataa itsenäisesti. Koska cobotti on helppo ohjelmoida esimerkillä, voi kuka tahansa tehtävän osaava ohjelmoida cobotin. [7]

Viimeistelytehtävät voivat olla ihmiselle raskaista ja rasittavia. Viimeistelyssä esimerkiksi hiontaan tai kiillotukseen käytettävät työkalut vaativat voimaa ja työkalujen aiheuttama tärinä voi aiheuttaa rasitusvammoja. Tehtävät vaativat myös tarkkuutta ja ihmisen väsyessä tarkkuus ja laatu kärsivät. Kuten prosessitehtävissä, cobottiin voidaan asentaa tarvittava työkalu ja ohjelmoida se esimerkillä suorittamaan tehtävä tarkasti ja toistuvasti. [7]



**Kuva 8.** Liimapistoolilla varustettu LBR iiwa [34].

Järjestelmä- ja konevalmistaja Dürr on kehittänyt järjestelmän autoteollisuuteen, jossa KUKA LBR iiwa -cobotti levittää liimaa autojen polttoainetankkeihin (Kuva 8). Tehtävässä työntekijä puhdistaa tankin ja asettaa sen cobotin eteen. Kun cobotti on valmiina levittämään liimaa, suutin avautuu ja cobotti levittää liiman tasaisesti. Työkalussa olevat sensorit valvovat, ettei liima tule mihinkään kohtaan liikaa. Kun liima on levitetty, työntekijä asettaa tankin ajoneuvoon kiinni. Toteutus parantaa tuotettua laatua, säästää aikaa ja vähentää yksikkökustannuksia. Dürr on myynyt kymmenen tällaista järjestelmää ja kehittää samantapaisia järjestelmiä myös muille teollisuuden aloille. [34]

### 5.2.4 Kokoonpano ja laaduntarkastus

Kokoonpanossa yhdistetään osia luomaan kokonaisia tuotteita. Kuten aiemmissa tapauksissa, myös kokoonpano voi olla ihmiselle turhauttavaa ja aikaa vievää, siten altistaen tuotteet virheille. Cobotti vapauttaa ihmisen muihin tehtäviin, hoitaa työn tarkemmin ja tehokkaammin sekä eliminoidaan työhön liittyvät riskit. [6]



**Kuva 9.** YuMi kokoamassa pistorasioita [35].

ABB:n kaksikäätinen cobotti YuMi on suunniteltu erityisesti kokoonpanotehtäviä varten. ABB:n Elektro-Pragan tehtaalle Prahassa on asennettu YuMi suorittamaan kokoonpanotehtävää ihmisen kanssa (Kuva 9). Toteutuksessa YuMi käsittelee pistorasioihin kuuluvia jousia, lapsilukkoja ja lapsilukkojen suoja. Prosessi alkaa, kun ihminen asettaa kaksi pistorasiankantta ja kaksi lapsilukonsuojaa YuMi:n eteen. Cobotti tarttuu lapsilukkoihin ja asettaa ne pistorasiankansiin, jonka jälkeen se tarttuu ja asettaa kaksi joustaniille tarkoitettuihin kohtiin. Lopuksi YuMi asettaa lapsilukonsuojan paikoilleen, jonka jälkeen työntekijä ruuvaa kannen kiinni. [35]

Laaduntarkastus on mille tahansa yritykselle tärkeä, mutta myös itseään toistava tehtävä. Ihmisen sitä hoitaessa voi tapahtua virheitä ja tuotteessa olevat viat jäädä huomaamatta. Tehtävä voidaan automatisoida cobotilla, jonka päähän on asennettu kamera. Cobotti voi ottaa tuotteesta kuvan ja verrata sitä tietokannassa oleviin arvoihin tai 3D-malliin. Jos arvot eivät täsmää määrättyihin arvoihin tai tuote ei täsmää malliin, voidaan tuote välittömästi poistaa linjalta ennen kuin se pakataan. Cobotti takaa tarkkuudellaan

tuotteiden tasaisen laadun, kuten esimerkiksi tasaisen hitsausjäljen tai hedelmän oikean muodon. [7,36]



**Kuva 10.** CR-7iA/L tarkistamassa hitsauksen laatua [37].

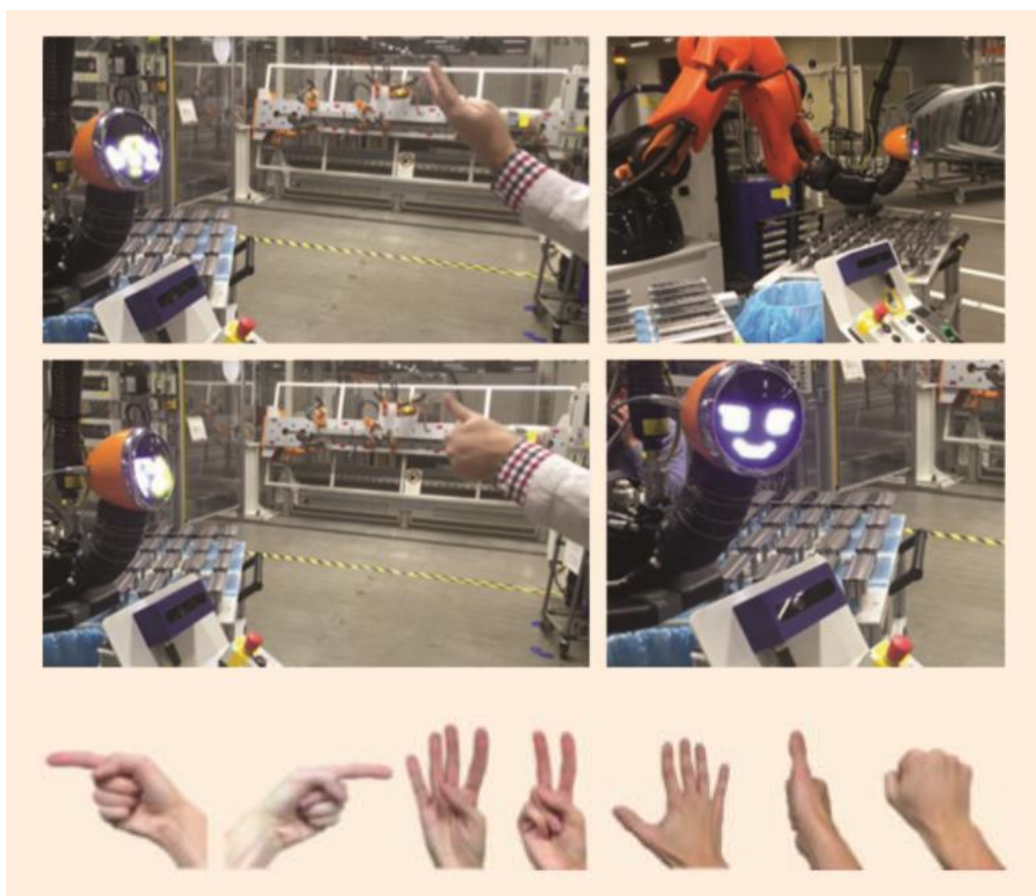
Audi käyttää hitsauksen laaduntarkastukseen FANUC:in CR-7iA/L -cobottia (Kuva 10). Cobotti pystyy tarkistamaan autojen runkojen hitsauksien laatua paikoista, joista ihmisen olisi vaikeaa jälkeä tarkistaa. Cobotin työkaluksi on asennettu näköjärjestelmä, jonka avulla hitsaukset tarkistetaan. Cobotti ei korvaa ihmisiä vaan täydentää heidän suorittamaansa laaduntarkastusta. Cobotin ansiosta työntekijät luottavat enemmän tuottamiinsa tuloksiin, koska cobotti suorittaa osan heidän tehtävistään ja siten heillä on enemmän aikaa keskittyä tarkemmin omiin tehtäviinsä. [37]

### 5.2.5 Esimerkkijärjestelmä

Audin tapauksessa cobottia käytetään laittamaan liimaa kattotelineen vahvistuspaloihin. Tehtävässä työntekijä otti palan säiliöstä ja asetti sen pöydälle. Pöydän molemmilla puolilla on linjat, jotka kuljettavat kaksi- ja neliovisia autoja. Pöydällä oleviin paloihin laitettiin kaksi viivaa liimaa liimapyssyllä, jonka jälkeen työntekijä asetti sen sopivaan autoon toisella linjalla. Ihmisen tehdessä tätä työtä ei laatu ollut tasaista vaan liima levittyi epätasaisesti. Työ oli ihmiselle itseään toistavaa ja tuotettu laatu riippui ihmisen taidosta ja



tarkkaavaisuudesta. Cobotti sopi tähän tehtävään hyvin tuottamaan tasaista laatua ja vapauttamaan ihmisen itseään toistavasta ja sotkuisesta työstä. [38, s. 54]



**Kuva 11.** Walt-cobotti ja kommunikointia sen kanssa [38, s. 55].

Cobotti joka Audin Brysselin tehtaalle asennettiin, sai nimen Walt (Kuva 11). Se työskentelee ihmisten lähellä ilman turvaverkkoja. Robovision kehitti Waltille liikkuvan robottipään, joka ilmaisee tunteita kommunikoidakseen ihmisten kanssa. Cobotti pystyy ilmaisemaan asioita liikuttelemalla silmiään ja nyökyttelemällä tai ravistamalla päätänsä. [38, s. 54]

Tehdas ympäristö on meluisa, joten kommunikointi Waltin kanssa tapahtuu käsillä viittomalla. Eri eleet on esitetty kuvassa 11. Waltia ohjataan osoittamalla sormella oikealle tai vasemmalle, viitaten linjaan, jolla olevaan autoon osa liimataan. Jotta Walt osaa valita oikean osan, näytetään neljää tai kahta sormea ovien lukumäärään viitaten. Toiminto

hyväksytään tai perutaan näyttämällä peukaloa ylös tai alas. Mikäli robotti tulkitsee väärin tai operaattori tekee virheen, voidaan toiminto perua näyttämällä nyrkkiä. [38, s. 55]

Walt tunnistaa eleet Robovisionin kehittämän RoboSense -kameran avulla. Kamera koostuu 3D-kamerasta, RGB-kamerasta ja prosessorista. 3D-kamera erottaa etäisyyden ja siten käden kuvasta. Käden ympärille muodostetaan ikkuna, josta kuva otetaan. Ikkunasta otettua kuvaa prosessoidaan ja muokataan vektoriksi, joka syötetään neuroverkolle. Kamera pystyy myös tunnistamaan operaattorin kasvot ja siten varmistamaan, että operaattori saa työskennellä Waltin kanssa. Tunnistuksen tukena toimii sormenjälkitunnistin. [38, s. 55]

Kameroiden avulla Walt myös tunnistaa oikean osan telineeltä. Kameran on asennettu palkkiin, joka liikkuu yhdessä robotin kanssa. Järjestelmä pystyy liikkuvuutensa ansiosta tunnistamaan oikean telineen ja sieltä oikean osan itsenäisesti. [38, s. 56]

Liimausprosessiin käytettiin MRK-Systemen KUKA KR 5 SI -robottia. KR 5 SI on MRK-Systemen tarjoama teknologia paketti, jolla KUKA KR 5 ARC HW -robotti saadaan muunnettua ISO 10218 ja ISO 15066 mukaiseksi yhteistyörobotiksi. Paketti perustuu viiteen toiminnallisuuteen. KUKA.SafeOperation -ohjelmisto vahtii robotin asentoa ja nopeutta. Robottiin on asennettu pehmusteita joka puolelle vähentämään törmäysvoimaa. Pehmusteet pitävät sisällään myös kapasitiivisia läheisyysantureita, jotka huomaavat ihmisen läheisyyden sähkökentän vaihtelusta mittaamalla permittiivisyyttä. Systemissä on kuusi tai seitsemän anturialuetta, jotka mittaavat läheisyyttä. Robotin työkalu on varustettu irtoavalla laipalla, joka irrottaa robotin työkalun, mikäli se törmää johonkin. [39]

Robotti valikoitui käyttöön, sillä se oli toteutuksen aikaan ainoa saksalaisen puu- ja metallityöyhdistyksen turvalliseen yhteistyöhön ihmisen kanssa hyväksymä robotti. Audin käytössä robotti vaati vielä lisäsuojauksia terävän liimapysyn takia, joten työkalu ympäröitiin muovikuorella. [38, s. 56]

Operaattorin tehtävä prosessissa on käsimerkein kertoa Waltille, kun automalli vaihtuu ja tarvitaan toista osaa. Lisäksi operaattori asettaa osia telineelle, josta Walt voi ne ottaa. Robotin käytössä tapahtuvia virheitä on pyritty vähentämään tehtaalta löytyvillä ohjeilla sekä lattiaan asennetuilla vuorovaikutusalueilla merkkeillä. Työvuorossa Waltin kanssa on aina kaksi työntekijää, jotka vuorottelevat työntekoa. [38, s. 57]

Waltin ansiosta autojen laatu parani ja niiden autojen määrä, jotka eivät läpäise liimauksen laatukriteerejä, väheni 15 prosenttia. Myös liimaa kului 20 prosenttia vähemmän, kuin ennen Waltia. Työntekijät ovat hyvin tyytyväisiä Waltiin ja ylpeitä saadessaan työkennellä uuden teknologian kanssa. [38, s. 56–57]



## 6. YHTEENVETO

Yhteistyörobotit eli cobotit ovat robotteja, jotka on suunniteltu toimimaan yhteistyössä ihmisten kanssa. Niiden suunnittelussa on keskitytty myös edullisuuteen ja helppoon integrointiin, joten myös pienet ja keskisuuret yritykset voivat automatisoida prosessejaan ja suuret yritykset voivat automatisoida prosessejaan entistä pidemmälle. Cobottien tavoitteena on yhdistää ihmisen ja robotin kyvykkyudet ja siten saada aikaan tehokas ja joustava prosessi. Cobottien ansiosta ihmiset säästävät itseään toistavilta tehtäviltä ja niistä aiheutuvilta rasitusvammoilta. Usein yhteistyörobotit eivät tarvitse häkkeitä toimiakseen, sillä turvallisuus toteutetaan sensoreiden ja voiman rajoituksen avulla. Jokaisessa prosessissa se ei kuitenkaan onnistu standardien määrittelemällä tavalla, vaan tarvitaan muitakin turvatoimenpiteitä. ISO standardisointisjärjestö on kehittänyt standardeja määrittelemään robottien turvallista toimintaa ihmisten kanssa ja niihin liittyvien riskien arviointia. Standardin osa teho- ja voimarajoitteisista roboteista kuvailee tässä työssä käsiteltyjä cobotteja.

Cobotit ovat kehittyneet paljon 90-luvun kolmipyöräisestä nostoavustajarobotista cobotteihin, jotka voivat työskennellä ihmisten kanssa suorassa vuorovaikutuksessa. Kehitys lähti liikkeelle vuonna 1995, kun Michael Peshkin ja J. Edward Colgate yhdessä General Motorsin kanssa kehittivät linjatyöntekijöille älykästä apulaitetta raskaiden taakkojen liikkutteluun. Robottikäsiksi yhteistyörobotit muovaantuivat Etelä-Tanskan yliopiston työryhmän johdolla, kun ryhmä perusti Universal Robotsin. UR kehitti cobotin, joka oli helppo ohjelmoida ja sopiva myös pienyrityksille.

Cobotit eroavat raskaista teollisuusroboteista useilla tavoilla. Tärkein ominaisuus coboteilla on yhteistyö. Cobotit työskentelevät häkin sijaan samassa työtilassa ihmisten kanssa ja nostelevat raskaita osia tai työstävät osia jollain työkalulla. Yhteistyö voi olla jaettu työtila, jossa ei tapahdu suoraa vuorovaikutusta tai reaaliajassa ihmiseen reagoiva cobotti. Turvallisuus on coboteissa toteutettu erilaisten ihmistä aistivien sensoreiden avulla, rajoittamalla niiden voimaa sekä pyöreitä reunoja ja kevyitä rakenteita käyttäen. Sensorit voivat havaita ulkoisen voiman ja lopettaa cobotin toiminnan törmäyksen sattuessa. Cobottien sisältämien tietokoneiden avulla ne voidaan kytkeä IoT:hen ja kerätä

dataa analysointia varten. Tietotekniikan ansioista cobotit ovat myös helppoja ohjelmoida. Kuka tahansa prosessin tunteva työntekijä voi ohjelmoida cobotin esimerkin avulla eli näyttäen cobotille kädellä reittiä. Helppo ohjelmointi, kevyet rakenteet ja turvallisuusominaisuudet tarkoittavat myös edullista toteutusta. Yritykset säästävät rahaa, sillä cobotit eivät vaadi suuria turvallisuusratkaisuja tai kalliita ohjelmoijia. Ominaisuuksiensa ansiosta cobottien sijoitetun pääoman tuottoaste on korkea. Cobottijärjestelmät sisältävät kuitenkin myös piilokuluja, joita on vaikea ennakoida. Näiden kulujen ennakkoinnissa auttaa riskien arviointi. Riskien arvioinnin avulla voidaan päätellä onko cobotti järkevä ratkaisu.

Työn lopussa käsiteltiin alan päätekijöiden cobotteja, niiden ominaisuuksia ja niiden käyttösovelluksia. Esiteltyjä cobotteja oli Universal Robotsilta, FANUC:ilta, Techma Robotilta, ABB:ltä ja KUKA:lta. Cobottien hyötykuormat vaihtelivat kolmesta aina 36:een kiloon asti ja niiden ylettyvyudet olivat välillä 500-1813 millimetriä. Käyttösovelluksia coboteilla on useita. Cobotti voi esimerkiksi poimia tai pakata kappaleita tarttujan avulla, hoitaa konetta asettamalla sinne kappaleita ja poistamalla niitä, hitsata tai hioa kappaleita työkalujen avulla, koota kappaleita tai tarkistaa niiden laatua kameroita käyttäen. Kaikissa käyttösovelluksissa cobotti vapauttaa ihmisen itseään toistavasta ja mahdollisesti rasittavasta tehtävästä samalla parantaen tarkkuutta ja tuottavuutta ja siten yrityksen tuottamaa laatua.

Cobotit sopivat siis monenlaisille ja -kokoisille yrityksille ja useisiin eri tehtäviin. Tulevaisuudessa automaation määrän kasvaessa tehtailla, myös cobotit yleistyvät ja niiden markkinat kasvavat. Tulevaisuudessa myös teknologian kehittyessä pystytään toteuttamaan entistä monimutkaisempia, voimakkaampia, nopeampia ja turvallisempia cobottijärjestelmiä esimerkiksi koneoppimista, tekoälyä ja konenäköä hyödyntäen.

Mahdollisissa jatkotutkimuksissa voisi perehtyä syvemmin esimerkiksi cobottien ohjelmistoihin, teknisiin toteutuksiin, niiden osiin tai turvajärjestelmien toimintaan. Tutkia voisi myös uusia mahdollisuuksia kehittää cobottiteknologiaa ja mahdollisia uusia toteutuksia teknologian kehittyessä sekä cobottien vaikutusta markkinoihin ja tehdasautomaatioon tulevaisuudessa.

## LÄHTEET

- [1] M. Peshkin, J. Colgate, Cobots, Industrial Robot, Vol. 26, Iss. 5, 1999, pp. 335–341.
- [2] How Universal Robots sold the first cobot, Universal Robots, verkkosivu, 2019, saatavissa (viitattu 24.9.2019): <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/the-history-behind-collaborative-robots-cobots/>
- [3] J. Laplace, Human-robot interaction finally reaches the work floor, Human Robotics, 2014, saatavissa: <https://www.generationrobots.com/blog/wp-content/uploads/2014/01/Lightweight-robots-and-Collaborative-Robotics.pdf>
- [4] Cobots: the rise of the collaborative robot(cobot), i-SCOOP, 2016, verkkosivu, saatavissa (viitattu 24.9.2019): <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/cobot-collaborative-robot/>
- [5] A. Sharma, Cobot Market Outlook Still Strong, Says Interact Analysis, Robotics Business Review, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 24.9.2019): <https://www.roboticsbusinessreview.com/manufacturing/cobot-market-outlook-strong/>
- [6] N. Joshi, 5 Applications Of Collaborative Robots In Manufacturing, Forbes, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 28.9.2019): <https://www.forbes.com/sites/cognitiveworld/2019/08/09/5-applications-of-collaborative-robots-in-manufacturing/#55f82d2a6507>
- [7] C. Gonzalez, 7 Common Applications for Cobots, Machine Design, 2018, verkkosivu, saatavissa (viitattu 28.9.2019): <https://www.machinedesign.com/motion-control/7-common-applications-cobots>
- [8] Human-robot collaboration (HRC), KUKA, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 14.10.2019): <https://www.kuka.com/en-us/future-production/human-robot-collaboration>

- [9] Demystifying Collaborative Industrial Robots, International Federation of Robotics, 2018, saatavissa (viitattu 14.10.2019): [https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Demystifying\\_Collaborative\\_Robots.pdf](https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf)
- [10] Robots and robotic devices — Collaborative robots, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, ISO/TS 15066:2016, 2016.
- [11] Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN ISO 10218-2:2011, 2011.
- [12] J. Teresko, Here Come the Cobots, Industry Week, 2004, verkkosivu, saatavissa (viitattu 16.10.2019): <https://www.industryweek.com/automation/here-come-cobots>
- [13] A.Morris, 20 Years Later: Cobots Co-opt Assembly Lines, Northwestern University, 2016, verkkosivu, saatavissa (viitattu 16.10.2019): <https://www.mccormick.northwestern.edu/news/articles/2016/08/twenty-years-later-cobots-co-opt-assembly-lines.html>
- [14] M. Peshkin, J. Colgate, W. Wannasuphoprasit, C. Moore, R. Gillespie, P. Akella, Cobot Architecture, IEEE Transaction On Robotics And Automation, Vol. 17, iss. 4, 2001, pp. 377–390.
- [15] M. Peshkin, J. Colgate, W. Wannasuphoprasit, P. Akella, Cobots: A Novel Material Handling Technology, Proceedings of IMECE, 1998, saatavissa (viitattu 16.10.2019): <https://pdfs.semanticscholar.org/c98f/d46895c36f753687221b77d19b95dbc29e38.pdf>
- [16] K. Pittman, A History of Collaborative Robots: From Intelligent Lift Assist to Cobots, engineering.com, 2016, verkkosivu, saatavissa (viitattu 17.10.2019): <https://new.engineering.com/story/a-history-of-collaborative-robots-from-intelligent-lift-assists-to-cobots>

- [17] Esben Østergaard, Co-Founder, Inventor, Entrepreneur, REInvest Robotics, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 17.10.2019): <https://www.reinvestrobotics.com/about/esben-ostergaard/>
- [18] From Cobot Pioneer To The “Nobel Prize” Of Robotics, Universal Robots, 2018, verkkosivu, saatavissa (viitattu 17.10.2019): <https://blog.universal-robots.com/from-cobot-pioneer-to-the-nobel-prize-of-robotics>
- [19] LBR iiwa, KUKA, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 17.10.2019): <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>
- [20] ABB’s Collaborative Robot – Yumi, ABB, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 17.10.2019): <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-14000-yumi>
- [21] Industrial Robots made for higher productivity, FANUC, verkkosivu, saatavissa (viitattu 17.10.2019): <https://www.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-range-page>
- [22] Cobots EBook, Robotiq, 2017, saatavissa (viitattu 24.10.2019): <https://blog.robotiq.com/hubfs/COBOT%20EBOOK%20FINAL.pdf>
- [23] E. Østergaard, The Role of Cobots in Industry 4.0, Universal Robots, 2017, saatavissa (viitattu 24.10.2019): <https://info.universal-robots.com/hubfs/Enablers/White%20papers/The%20role%20of%20cobots%20in%20industry.pdf?submissionGuid=5d0aa6e7-c126-49ec-80cf-0e9d8c4f6aba>
- [24] K. Vozel, The True Cost of Cobots, MoldMaking Technology, Vol. 20, Iss. 9, 2017, pp. 18, 20–21.
- [25] J. Lawton, Collaborative Robots, Intech Magazine, Sep 2016, pp. 12–14.
- [26] P. Zelinski, Cobots Are Coming, Modern Machine Shop, Vol. 91, Iss. 9, 2019, pp. 62, 64, 66.
- [27] S. El Zaatari, M. Marei, W. Li, Z. Usman, Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 116, Jun 2019, pp. 162–180.

- [28] Collaborative robots from Universal Robots, Universal Robots, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 2.11.2019): <https://www.universal-robots.com/products/>
- [29] Mobile Series, TechMan Robot, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 2.11.2019): <http://tm-robot.com/mobile-series/>
- [30] LBR iisy, KUKA, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 2.11.2019): <https://www.kuka.com/en-us/future-production/human-robot-collaboration/lbr-iisy>
- [31] Hofmann Glastechnik GMBH, Universal Robots, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 2.11.2019): <https://www.universal-robots.com/case-stories/hofmann-glastechnik/>
- [32] Robotic Machine Tending, Numatic Engineering, verkkosivu, saatavissa (viitattu 2.11.2019): <https://www.collaborativerobotarm.com/robot-machine-tending>
- [33] Machine Tending With AGV, TechMan Robot, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 10.11.2019); <http://tm-robot.com/en/blog/machine-tending-with-agv/>
- [34] Human-Robot Collaboration: 3 Case Studies, Wewolver, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 14.12.2019): <https://www.kuka.com/en-my/industries/solutions-database/2019/09/seam-sealant-application-at-daimler>
- [35] Case study: YuMi manufacturing sockets at ABB's plant in the Czech Republic, ABB, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 10.11.2019): <https://new.abb.com/products/robotics/case-studies/abb-elektro-praga-czech-republic>
- [36] Quality inspection by a cobot, Olmia Robotics, verkkosivu, saatavissa (viitattu 15.11.2019): <https://www.olmia-robotics.com/applications/quality-inspection>
- [37] Audi uses FANUC collaborative robots to check welds, FANUC, verkkosivu, saatavissa (viitattu 15.11.2019): <https://www.fanuc.eu/be/en/customer-cases/audi>

- [38] I. El Makrini, S. Elprama, J. Van den Bergh, B. Vanderborght, A. Knevels, C. Jewell, F. Stals, G. De Coppel, I. Ravyse, J. Potargent, J. Berte, B. Diericx, T. Waegeman,, A. Jacobs, Working with Walt, IEE Robotics & Automation Magazine, Jun 2018, pp. 51–58.
- [39] C. Bernier, KUKA's Collaborative Robot Option: KR 5 SI, Robotiq, 2013, verkkosivu, saatavissa (viitattu 16.11.2019): <https://blog.robotiq.com/bid/68142/KUKA-s-Collaborative-Robot-Option-KR-5-SI>